

# 钢井壁失稳原因浅析及预防

肖伟<sup>1</sup>, 王自强<sup>2</sup>, 杨述起<sup>2</sup>, 周团正<sup>2</sup>

(1. 中铁大桥局股份有限公司机械租赁分公司, 湖北 武汉 430050; 2. 上海广联建设发展有限公司, 上海 200438)

**摘要:** 钻井法施工的一些开采年限较短、井深和井径较小的竖井中, 有时采用钢井壁作为永久支护, 但是相对于钢筋混凝土井壁, 钢井壁在使用过程中极易发生屈曲变形, 甚至导致井筒破坏, 使用中应引起高度的重视。结合工程实例, 对钢井壁失稳时的临界应力、影响因素进行了分析, 并提出了相应的预防措施。

**关键词:** 钻井法; 钢井壁; 失稳; 预防

**中图分类号:** TD261.1   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-7428(2009)10-0058-03

**Brief Analysis on the Cause of Steel Shaft Lining Instability and the Prevention/XIAO Wei<sup>1</sup>, WANG Zi-qiang<sup>2</sup>, YANG Shu-qi<sup>2</sup>, ZHOU Tuan-zheng<sup>2</sup>** (1. China Railway Major Bridge Engineering Group Co., Ltd., Wuhan Hubei 430050, China; 2. Shanghai Guanglian Construction and Development Co., Ltd., Shanghai 200438, China)

**Abstract:** Vertical shafts with short production life, small hole depth and diameter, which are constructed by drilling method with permanent steel lining sometimes, compared with reinforced concrete shaft lining, steel shaft lining easily causes buckling deformation even the shaft damage. With field cases, the paper analyzed the critical buckling stresses and influencing factors under the instability of steel shaft lining, and put forward the corresponding preventive measures.

**Key words:** drilling method; steel shaft lining; instability; prevention

## 0 引言

钻井法施工的矿山竖井, 永久支护通常采用钢筋混凝土井壁、钢板-钢筋混凝土复合井壁或钢井壁。而钢井壁具有加工简单、施工周期短的优点, 可使用在一些开采年限较短、井深和井径较小的竖井工程中, 但是相对于钢筋混凝土井壁, 钢井壁在承受较小的荷载时, 也可能发生井壁的失稳变形, 甚至导致井筒破坏, 在使用中应引起高度的重视。

## 1 钢井壁的典型失稳情况

钢井壁使用过程中存在的一个主要问题就是井壁的失稳变形, 钢井壁的失稳大致可分为以下 2 种情况。

### 1.1 安放或壁后充填时的失稳

钢井壁在安放过程或安放后至充填结束前, 由于受到较大的外力作用或自身刚度不足, 导致钢井壁在较大高度范围内整体失稳。此种情况, 钢井壁失稳较为突然, 且井壁后为流动性的泥浆或水泥浆, 因此钢井壁失稳时变形范围较大, 径向在某个方向内凹的同时, 对应的在其他方向产生外凸, 外凸的最大尺寸接近于钻井直径。如在井壁安放过程中发生失稳, 由于钢井壁变形导致承受的浮力突然减小或

井壁内大量进入泥浆而重力突然加大, 井壁将快速下坠至井底, 严重危及人员和机械设备安全, 可能导致重大事故的发生。

### 1.2 检查孔压浆时的失稳

竖井交付使用前, 需对壁后充填质量进行检查, 如壁后充填质量检查不合格或单孔漏水量超过要求时, 应通过检查孔进行二次压浆, 压浆过程中由于钢井壁局部受到较大的浆液压力, 导致局部失稳。井壁失稳后, 如不采取必要措施, 变形范围将迅速扩大, 影响到钢井壁的正常使用时及井筒安全。

## 2 钢井壁失稳的工程实例

### 2.1 钢井壁安放时的失稳实例

某竖井采用钻井法施工, 井筒直径为 2.6 m, 井筒深度为 91.6 m, 钢井壁采用  $\delta = 16$  mm 的 Q235B 钢板制作, 采用漂浮法下沉钢井壁, 当钢井壁下沉至距离井底 4.6 m 时, 钢井壁整体失稳破坏, 井壁快速坠至孔内。将钢井壁强力拔出后发现, 井深 12.0 ~ 64.0 m 范围内钢井壁严重变形, 变形后的钢井壁径向为哑铃状, 最大变形处在井深 32.5 ~ 37.0 m 处, 长轴达 3.16 m, 短轴为 1.54 m, 如图 1 所示。

### 2.2 二次压浆过程中的失稳实例

收稿日期: 2009-05-08

作者简介: 肖伟(1966-), 男(汉族), 广东人, 中铁大桥局股份有限公司机械租赁分公司, 机械设备制造、项目工程管理专业, 从事桥梁和各类基础施工及其管理、施工机械设备的管理和研制工作, 湖北省武汉市汉阳大道 54-2 号。

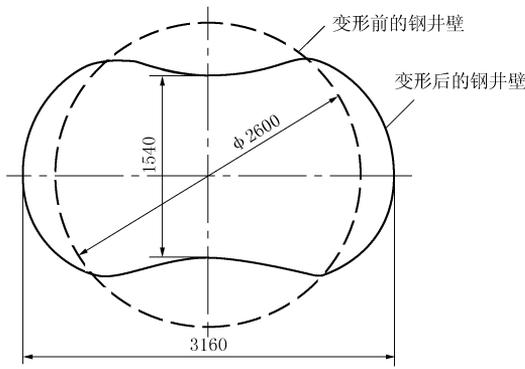


图1 钢井壁安放过程失稳后示意图

某铁矿竖井采用钻井法施工,利用钢井壁作为永久支护,井筒直径为 3.8 m,井筒深度为 86.0 m,钢井壁采用  $t=20$  mm 的 Q235B 钢板制作。在对壁后充填质量进行检查时,发现壁后夹有泥浆且漏水量较大,在通过检查孔二次压浆时,发生井壁局部失稳,钢井壁向内“鼓包”,开始时“鼓包”范围约为  $0.04 \text{ m}^2$  左右,随后不断扩大至轴向 14.5 m、径向 1.5 m 的巨大变形,如图 2 所示。

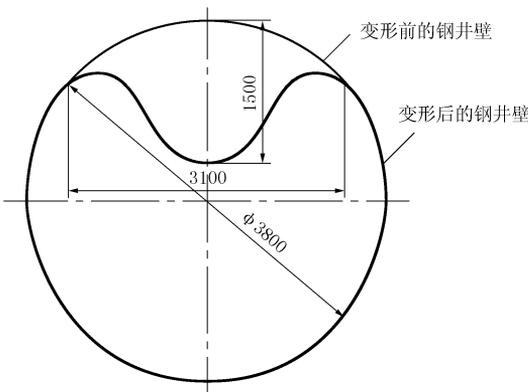


图2 钢井壁二次压浆时的失稳示意图

### 3 钢井壁失稳时的临界应力分析

工程中使用钢井壁作为永久支护,主要是利用钢井壁加工方便、强度高的特点,但钢井壁为什么在受到较小的荷载作用时,会发生失稳变形,甚至导致井壁破坏呢?这主要是由钢结构失稳时的临界应力决定的。

钢井壁安放到井内后,主要承受径向的水土压力作用,因此可将其视为承受径向压力  $p$  的圆柱壳进行分析,由于钢井壁内每隔 1.5 m 设置一道双  $\Delta$  支撑(见图 3),因此可取计算长度  $l=1500$  mm。参照美国石油学会《岸外固定平台设计与建造规范》第 18 版 API-RP2A-89 中的规定,对于承受径向压力的圆柱壳,其临界应力与参数  $\delta_x = l/\sqrt{tr}$  有关,

且随  $\bar{A} = \delta_x - 1.17 + 1.0618k$  ( $\bar{A}$  为稳定系数; $k$  为荷载系数,承受径向压力时, $k=0$ ) 而变化。

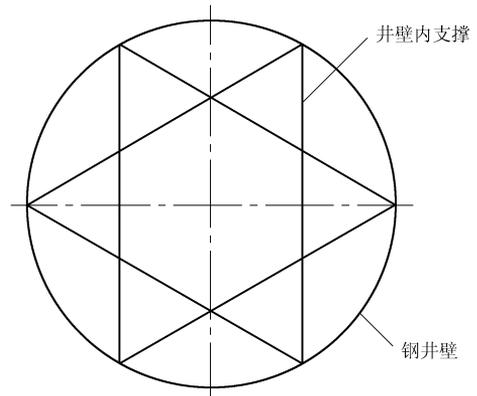


图3 钢井壁内双  $\Delta$  支撑

结合 2.2 中的实例,对于直径 3.8 m,厚度 20 mm 的 Q235 钢井壁,当计算长度  $l=1500$  mm 时:

$$\delta_x = l/\sqrt{tr} = 1500/\sqrt{20 \times 1900} = 7.69$$

式中: $\delta_x$ ——圆柱壳的壳长系数; $l$ ——圆柱壳的计算长度,mm; $t$ ——钢板厚度,mm; $r$ ——圆柱壳的半径,mm。

$$\bar{A} = \delta_x - 1.17 + 1.0618k = 6.52$$

因  $2.5 < \bar{A} < 0.208r/t$ ,故临界径向压力为:

$$P_{cr} = (0.92E/\bar{A})(t/r)^2 = 3.22 \text{ N/mm}^2$$

式中: $P_{cr}$ ——承受径向荷载时的临界压力, $\text{N/mm}^2$ ; $E$ ——弹性模量, $\text{N/mm}^2$ 。

考虑缺陷影响时,相应的临界径向应力为:

$$\sigma_{\varphi,ce} = 0.8P_{cr}(r/t)k_l$$

式中: $\sigma_{\varphi,ce}$ ——承受径向荷载时的临界应力, $\text{N/mm}^2$ ; $k_l$ ——系数, $\delta_x \geq 3.42$  时, $k_l = 1$ 。

则:

$$\sigma_{\varphi,ce} = 0.8P_{cr}(r/t)k_l = 244.72 \text{ N/mm}^2$$

该临界应力超出了弹性范围,需乘以塑性折减系数  $\eta$ 。

因  $\Delta = \sigma_{\varphi,ce}/f_y = 244.72/235 = 1.04$ ,则塑性折减系数为:

$$\eta = 0.45/\Delta + 0.18 = 0.61$$

非弹性屈曲时的临界应力:

$$\begin{aligned} \sigma_{\varphi,cp} &= \eta\sigma_{\varphi,ce} = 149.28 \text{ N/mm}^2 \\ &< f_y = 235 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

对于井深 86.0 m 的矿山竖井,最大的水土压力位于井深 86.2 m 处,此处的水土压力可按重液计算公式得出:

$$P_0 = 1.2H \times 10^{-2} = 1.03 \text{ N/mm}^2$$

其所对应的应力为:

$$\sigma = pr/t = 97.85 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{\varphi, cp}$$

从计算结果可以看出,承受径向压力时,钢井壁非弹性屈曲时的临界应力 $\sigma_{\varphi, cp}$ 远远小于其屈服强度 $f_y$ 。在正常情况下,水土压力对钢井壁产生的应力小于非弹性屈曲时的临界应力,钢井壁能够满足使用要求,不会失稳。但当钢井壁所受的荷载大于 $\sigma_{\varphi, cp}$ 或钢井壁存在着较大的缺陷时,钢井壁将可能产生失稳变形。

#### 4 导致钢井壁失稳的主要因素

从上面计算可以看出,圆柱壳失稳时的临界应力随着钢材的屈服强度和壳体厚度的增加而增大,因此在采用钢井壁支护时,应选用较厚和具有较高屈服强度的钢板,但一味追求井壁的厚度和较高的屈服强度,将不可避免的造成材料的浪费和成本的提高。本文主要分析在材料厚度和强度确定的情况下,影响钢井壁失稳的一些因素。

##### 4.1 制作初始缺陷

钢井壁制作是将钢板卷曲成为一个圆柱壳,然后通过焊接连接而成。在制作过程中,钢井壁存在着尺寸偏差,并不能保证形成完全对称的圆柱壳,尤其是在板头(焊缝)位置钢井壁的弧度偏小,且存在着焊接残余应力。钢井壁的屈曲强度对缺陷较为敏感,缺陷的存在将大大降低井壁失稳时的临界应力。

##### 4.2 钻井偏斜

钻井发生较大偏斜,将导致钻井的有效断面减小,当有效断面直径接近于或小于钢井壁外径时,钢井壁在安放过程中孔壁将对其产生径向分力,钻井偏斜越严重,孔壁对其产生的径向分力也越大。钢井壁受到孔壁对其产生的径向力后,轻者将导致井壁的局部变形,重者将导致井壁整体失稳。

##### 4.3 钻井局部坍塌

井壁安放过程中由于井壁碰刮钻井孔壁、或因泥浆质量原因引起孔壁的局部坍塌,使钢井壁局部受到较大的土压力作用,当其超过失稳时的临界应力时,将可能导致钢井壁失稳变形。

钻井局部坍塌导致井壁的失稳主要发生在井壁安放后、壁后充填结束前。

##### 4.4 夹层水压力

壁后充填质量的好坏,不仅直接影响到止水的效果,而且对井壁的变形有着重要的影响。如果壁后充填质量较差,地下水就会渗透至井壁外侧,形成夹层水。随着时间的推移,夹层水压力逐渐增加,能给井壁造成极大的破坏力。

#### 4.5 检查孔压浆时产生的异常水压力

检查壁后充填质量时,如发现充填质量较差或漏水量较大,需通过检查孔压浆进行处理。由于难于准确控制单位时间内的压浆量,当压浆速度大于地下水从孔隙中的排走速度时,将导致水压力的快速升高和钢井壁负荷的快速增加,最终使钢井壁失稳变形。

### 5 钢井壁失稳的预防措施

为防止钢井壁在使用过程中的失稳变形,针对导致钢井壁失稳的主要因素,应采用以下预防措施。

#### 5.1 确保钻井质量

钻井偏斜和钻井的局部坍塌是导致钢井壁安放和壁后充填前失稳的主要因素,因此钻井过程应确保钻井偏斜率和有效断面满足要求,并随时检查泥浆的性能参数。安放井壁时保持井壁垂直,防止井壁碰刮孔壁,造成孔壁的局部坍塌。

#### 5.2 提高井壁加工质量,减少制作缺陷

加工钢井壁时,应按照设计图纸要求严格控制尺寸和形位制造误差。同时消除焊接应力。在吊运及存放钢井壁时,应采取相应的保护措施防止变形。

#### 5.3 钢井壁外设置加强肋、井壁内设置支撑

对于钢井壁而言,其厚径比均较大,通过在井壁外设置纵向和环向加强肋,在井壁内设置支撑,可有效地提高失稳时的临界应力,加强肋和支撑可通过计算确定。图4为钢井壁设置加强肋的情况。

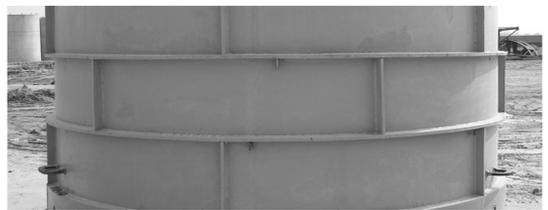


图4 钢井壁外的加强肋

#### 5.4 预留泄压孔

利用钢井壁作为永久支护时,在壁后充填质量合格且漏水量满足要求后,应在钢井壁上每隔一定间隙预留泄压孔,使渗入井壁后的地下水能够通过泄压孔排出,避免钢井壁在永久使用过程中夹层水压力的产生。

#### 5.5 完善二次压浆工艺,避免二次压浆时异常水压力的产生

通过检查孔二次压浆时,应先测量检查孔的漏水量,控制浆液的压入速度不大于水流的速度。压

(下转第63页)

其他4个。它的孔深不仅可以满足设计要求,而且深度随时间变化的幅度明显小于其他4个孔。

分析认为,采用水泥浆护壁,桩的端部为水泥浆或水泥与砂的混合物,它们凝固后的强度远高于土的强度,从而可以保证桩端质量,并且灌注过程中也容易保证桩身质量,不会发生混浆等事故。此外,孔深变化在满足设计要求的情况下,给从下入钢筋笼、导管到开始灌注混凝土,留有一定的准备时间。通过比较,最后决定采用水泥浆护壁,水灰比按1:0.8配制。

#### 4.3.2 试验桩施工

按照上述成孔工艺进行了3根试验桩施工。灌注时为了防止混凝土离析和刮擦孔壁,以及混凝土直接落入孔底引起浆液液面剧烈波动而导致的孔壁坍塌,因此灌注混凝土时下入导管。导管底端距孔底的距离控制在0.5m左右。开始灌注时,严格控制混凝土灌入量和速度,并保证灌注连续均匀,减小浆液液面波动。当导管外的混凝土面超过静水面后,才可以加快灌注速度。通过这些严格的技术措施,试验桩施工取得成功。试验桩测试采用高应变和低应变检测法,验证桩的极限承载力以及桩身的完整性。试桩结果见表2。

表2 试验桩检测结果表

桩号	孔深/m	地面标高/m	桩顶标高/m	砼强度等级	测试计算桩长/m	单桩极限承载力/kN	桩身结构完整性
试1	18.0	-1.653	-4.10	C20	15.5	2410	完整
试2	18.0	-1.666	-4.10	C20	15.4	2340	完整
试3	18.0	-1.646	-4.10	C20	15.5	2360	完整

试验桩经检测后,又对3号试验桩进行了取心验证。取心钻机为XY-2型岩心钻机,泥浆泵为BW150型。从取出的岩心观察,混凝土结构完整,全部岩心长度为16.27m,扣除大应变检测时桩顶

(上接第60页)

浆时在距离压浆孔2.0~3.0m的范围内布置泄压孔,并严格控制注浆压力,注浆压力不得大于钢井壁失稳时的临界压力,也不得超过该处静水压力0.5MPa。

## 6 结语

(1)钢井壁的失稳主要由其临界应力控制,失稳时的临界应力远小于其屈服强度。

(2)导致钢井壁失稳的因素不仅包括钢井壁的厚度、屈服强度和加工质量,而且还包括钻井质量、

制作高度0.8m,桩的长度与检测计算出的结果基本吻合,完全满足设计要求,同时也证明了孔底注浆护壁工艺的可行性。

从试验桩检测结果看出,孔底注浆护壁工艺在这种含水地层中可以满足长螺旋钻机成桩所要求的桩孔深度,并且在一定时间内能保持孔壁的稳定。混凝土在灌注过程中的施工质量风险也较全孔其他泥浆护壁要低,因此能够保证桩的施工质量。此外,由于孔底注入水泥浆,水泥凝固后的强度高于土的强度,改善了桩端质量,减小因桩底存在沉渣而降低单桩承载力的因素,因而可以提高单桩承载力。

#### 4.3.3 工程桩施工

根据试验桩施工所取得的经验,制定了一系列有针对性的操作规程。在所有进场人员进行学习和贯彻落实,明确岗位职责,落实岗位责任制和奖惩制度。通过严格的管理措施,工程施工质量得以保证,新工艺在整个施工过程中应用顺利,充分发挥了长螺旋钻机施工效率高的特点。整个施工过程中,只使用了一台长螺旋钻机,26天便完成了508根桩的施工。经检测全部合格,满足设计要求。

## 5 结语

孔底注浆护壁施工工艺解决了长螺旋钻机在含水砂层中的成孔问题,拓展了长螺旋钻机的使用范围,充分发挥长螺旋钻机施工效率高的特点。通过几年来在几个地层相似工程中的实践运用也证明了该工艺的可行性,并且均取得了不错的经济效益。

## 参考文献:

- [1] JGJ 94-94,建筑桩基技术规范[S].

地下水、二次压浆时的压力等。

(3)可采用综合预防措施,通过提高钢井壁加工质量、设置加强肋和支撑,保证钻井质量,预留泄压孔和改善二次压浆工艺等方法防止钢井壁的失稳变形。

## 参考文献:

- [1] 陈绍蕃. 钢结构稳定设计指南(第二版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2004.  
[2] 张景秀. 坝基防渗与灌浆技术(第二版)[M]. 北京:中国水利水电出版社,2002.